利用饲料原料中的营养成分含量和可消化营养成分建立肉羊常用蛋白质饲料原料代谢能的预测模型

万　凡[1,2]　赵江波[1]　马　涛[1]　臧长江[2]　马　晨[2]　杨开伦[2]　刁其玉[1*]

（1.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，北京　100081；2.新疆农业大学动物科学学院，乌鲁木齐　830052）

摘　要：本试验应用套算法分析肉羊常用蛋白质饲料原料中的营养成分含量和可消化营养成对有效能值的影响，基于饲料原料中的营养成分含量和可消化营养成分建立蛋白质饲料原料代谢能（ME）的预测模型。选取 36 只 22 月龄、体重为（52.6±1.4） kg 的杜泊×小尾寒羊 F_1 代杂交去势肉羊，采用完全随机区组设计分为 6 个组，包括 1 个基础饲粮组和 5 个试验饲粮组。利用消化代谢试验和呼吸代谢试验并结合套算法计算 5 种蛋白质饲料原料的消化能（DE）和 ME，并分析蛋白质饲料原料 DE、ME 与该原料中营养成分[干物质（DM）、有机物（OM）、总能（GE）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）]含量、可消化营养成分[可消化干物质（DDM）、可消化有机物（DOM）、可消化粗蛋白质（DCP）、可消化粗脂肪（DEE）、可消化中性洗涤纤维（DNDF）、可消化酸性洗涤纤维（DADF）]之间的相关关系。结果表明：饲料原料中的 OM 含量、DDM、DOM、DCP 与 DE 和 ME 均存在极显著正相关（P<0.01）；另外，DADF 与 DE 存在极显著负相关（P<0.01），与 ME 存在显著负相关（P<0.05）。通过饲料原料中的营养成分含量预测 ME 的方程为：ME（MJ/kg）=-82.855+2.391OM（%）+1.802EE（%）-6.21GE（MJ/kg）-0.121ADF（%）（R^2=0.910，n=30，P<0.01）；通过饲料原料中的可消化营养成分预测 ME 的方程为：ME（MJ/kg）=-5.564+30.526DOM（%）+55.402DEE（%）（R^2=0.841，n=30，P<0.01）；通过饲料原料中的可消化营养成分与 DE 共同预测 ME 的方程为：ME=-5.787+1.126DE（MJ/kg）+20.769DEE（%）（R^2=0.879，n=30，P<0.01）。综上所述，在本试验中，蛋白质饲料原料中的部分营养成分含量和可消化营养成分与 ME 之间存在显著相关，可通过饲料原料中的营养成分含量和可消化营养成分对肉羊蛋白质饲料原料的 ME 进行有效预测。

收稿日期：2016-11-15

基金项目：国家肉羊产业技术体系（CARS-39）；国家“十二五”支撑计划“肉羊健康养殖模式构建与示范”（2011BAZ01734）

作者简介：万　凡（1990—），男，陕西潼关人，硕士研究生，从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: wanfanfw@126.com

*通信作者：刁其玉，研究员，博士生导师，E-mail: diaoqiyu@caas.cn

关键词：肉羊；代谢能；消化能；蛋白质饲料原料；可消化营养成分；预测模型

中图分类号：S826　　文献标识码：A　　文章编号：

我国是世界养羊大国，存栏数和羊肉产量都占世界首位[1]。近年来我国学者开展了大量关于肉羊高效健康养殖的相关研究，分别从营养需要、疾病预防和饲养模式等方面改进我国传统肉羊养殖方式，开始逐步实现由放牧结合补饲过渡到全舍饲，并朝着集约化管理的发展方向推进[2-5]。从肉羊营养需要角度来讲，其营养需要量不仅和饲料原料组成及营养水平密切相关，还受饲料在动物体内的消化过程以及动物对饲料的真实利用情况的影响。目前，在肉羊上，能量饲料、蛋白质饲料通常只能测定总能（GE），消化能（DE）、代谢能（ME）则均无法直接测得，而国内外现行饲料营养价值表中的饲料原料 DE 和 ME 推荐值也大多是通过理论研究进行推算或体外试验得出[6]，因此建立一套饲料原料有效能值的预测模型显得尤为重要。在单胃动物上的研究表明，通过套算法以饲料原料中的营养成分含量作为预测因子，能够较为准确地建立 ME 的预测模型[7-9]。本团队前期已经对肉羊能量代谢进行了大量研究工作，刘洁等[10]以肉羊为试验动物，研究饲粮的营养成分含量和有效能值的相关性，研究发现可用饲粮的营养成分含量通过建立预测模型的方式预测饲粮的 ME，配合饲料在制作完成后可通过实验室常规检测分析预测其在动物体内的利用情况；赵明明等[11]和赵江波等[12]分别发现在采用直接法与套算法测定单一粗饲料和单一精饲料 ME 时无显著性差异，并表明套算法测定羊草 ME 时最佳的替代比例为 20%，套算法测定单一精饲料替换比例在 30%时，所得的 ME 与实际测定值最为接近。但随着研究的深入，研究人员发现单一的以混合饲粮预测有效能值可能会因饲粮种类差异较大出现预测结果的不准确；另外，不同精饲料之间也会因能量和蛋白质水平的较大差异影响预测模型的精确性。为此，还需要进一步研究利用饲料原料预测有效能值的精确性。通过将精饲料分类，区分为能量饲料和蛋白质饲料 2 类来探索建立预测模型，可建立更适合实际应用的预测模型。潘晓花等[13]研究证实，将饲料原料分类预测可提高预测模型的准确性，提高应用价值。因此，本试验将饲料原料分类筛选后，以肉羊常用蛋白质饲料原料为研究对象，研究其在动物体内的代谢情况，建立蛋白质饲料原料中的营养成分含量或可消化营养成分与有效能值之间的相关关系，进一步建立 ME 的预测模型，从而实现对肉羊蛋白质饲料原料 ME 的准确预测，为我国肉用绵羊原料营养价值评定、合理利用饲料资源以及肉羊饲养标准的制订提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验时间与地点

本试验于 2015 年 12 月至 2016 年 1 月在中国农业科学院南口中试基地进行。

1.2　试验设计与动物

试验选取 36 只 22 月龄体重为（52.6±1.4） kg 的杜泊×小尾寒羊 F_1 代杂交去势肉羊，采用完全随机区组设计分为 6 个处理，包括 1 个基础饲粮处理和 5 个试验饲粮处理。每个处理 6 只羊，试验共持续 16 d，其中前 8 天为预试期，后 8 天为粪尿收集期。粪尿收集期的最后 3 d 进行呼吸代谢试验，其中前 24 h 使动物适应呼吸代谢箱，确保动物正常状态，后 48 h 实测动物甲烷产量[14]。

1.3　试验饲粮

本试验基础饲粮由羊草、玉米、豆粕和预混料等组成，采用同一批原料进行配制以确保原料的一致性。根据本团队前期不同比例的精饲料不同梯度替换试验结果，单一精饲料替换比例在 30%时，所得的代谢能与实际测定值最为接近[12]，所以在本次试验饲粮分别由豆粕、菜籽粕、棉籽粕、花生粕以及玉米干全酒糟及其可溶物（DDGS）替换基础饲粮的 30%(仅替换基础饲粮中的羊草、玉米和豆粕)后重新组成。饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1　饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of diets (air-dry basis)　　　%

项目 Items	基础饲粮 Basal diet	豆粕饲粮 Soybean meal diet	菜籽粕饲粮 Rapeseed meal diet	棉籽粕饲粮 Cottonseed meal diet	花生粕饲粮 Peanut meal diet	玉米干全酒糟及其可溶物饲粮 Corn DDGS diet
原料 Ingredients						
替换精料		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
玉米 Corn	19.06	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25
豆粕 Soybean meal	12.19	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46
羊草 *Leymus chinensis*	66.46	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
石粉 Limestone	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

预混料 Premix[1)]	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]						
干物质 DM	93.02	92.86	92.67	93.04	91.92	92.45
有机物 OM	86.75	85.41	84.71	86.25	85.44	85.87
总能 GE/(MJ/kg)	17.89	18.18	18.23	18.4	18.37	18.84
粗蛋白质 CP	12.03	20.02	17.56	20.60	22.30	16.71
粗脂肪 EE	2.97	1.60	2.04	1.19	2.97	4.64
中性洗涤纤维 NDF	63.24	51.55	63.18	52.63	54.94	56.13
酸性洗涤纤维 ADF	31.26	24.61	33.09	22.96	24.96	23.31

1)预混料为每千克饲粮提供 The premix provides the following per kg of diets：VA 15 000 IU，VD 2 200 IU，VE 50 IU，Fe 55 mg，Cu 12.5 mg，Mn 47 mg，Zn 24 mg，Se 0.5 mg，I 0.5 mg，Co 0.1 mg。

2)营养水平为实测值。Nutrient levels are measured values.

1.4 饲养管理

试验前使用伊维菌素对肉羊进行驱虫，晨饲前称重并适应代谢笼。由于各饲粮的原料存在较大差异，所以自由采食量亦会不同，故试验开始前进行预饲，将采食量最低组的饲喂量定为各组试验期内的饲喂量[10]。

预试期完成饲粮过渡后，开始消化代谢试验和呼吸代谢试验。分别于 08:00 和 18:00 进行饲喂，每次各饲喂 600 g，自由饮水。采用全收粪尿法收集粪、尿，每天称取并记录每只羊排粪量，按 10%取样，将每只羊 5 d 的粪样混合后-20 ℃冷冻保存待测。用盛有 100 mL 10% H_2SO_4 的塑料桶收集尿液，以防止贮存过程中有尿酸沉淀，稀释至 5 L，对稀释尿液充分混合，用纱布过滤后每天取样 30 mL，将每只羊 5 d 的尿样混合后-20 ℃冷冻保存，以备测定尿能（UE）[15]。

1.5 测定指标及方法

试验过程中采集具有代表性的饲粮和粪样，依照《饲料分析及饲料质量检测技术》（第 3 版）[16]的方法测定其营养成分含量。其中：总能（GE）采用 PARR-6400 全自动氧弹量热仪测定；粗蛋白质（CP）含量采用 KDY-9830 全自动凯氏定氮仪测定：粗脂肪（EE）含量采用 ANKOMXT15i 全自动脂肪分析仪测定；同时测定样品中粗灰分、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、钙（Ca）和磷（P）含量。

对于 UE，采用如下方法测定：取 5 块定量滤纸分别测定能值，计算出滤纸的平均能值作为滤纸的能值，将 10 mL 尿液分多次滴在滤纸上，65 ℃烘干后测定能值，得到滤纸和尿

液的总能值，用滤纸和尿液的总能值减去滤纸的能值即得 UE。

甲烷产量由密闭呼吸箱连接 SABLE 开路式循环气体测定装置、LGR 气体分析仪（购于美国 Sable Systems International 公司，产于 North Las Vegas）和配套的计算机程序共同完成。试验动物第 1 天适应呼吸测代谢箱后，开始连续 24 h 的气体测定，在 24 h 内每 0.5 h 测定 1 次呼吸代谢箱内甲烷的产量，每只试验动物共得到 48 个甲烷产量的试验数据，取其平均值作为每天每只试验动物的甲烷产量。

16 计算公式

饲粮及待测饲料原料中营养成分表观消化率参照 Adeola[17]的公式计算：

饲粮中某种营养成分的表观消化率（%）=100×（食入饲粮总量×饲粮中该营养成分的含量-排粪量×粪中该营养成分的含量）/（食入饲粮总量×饲粮中该营养成分的含量）；

待测饲料原料中某种营养成分的表观消化率（%）=100×[试验饲粮中某种营养成分的表观消化率－（100－待测饲料原料替代基础饲粮供能的百分率）×基础饲粮中该营养成分的表观消化率]/待测饲料原料替代基础饲粮供能的百分率。

套算法测定待测饲料原料有效能值的计算公式[18]如下：

待测饲料原料的有效能值（包括 DE 和 ME）=100×[试验饲粮的有效能值-（100-待测饲料原料替代基础饲粮供能的百分率）×基础饲粮的有效能值]/待测饲料原料替代基础饲粮供能的百分率。

饲粮的 DE（MJ/kg）=GE－粪能（FE）；

饲粮的 ME（MJ/kg）=GE－[FE＋UE＋甲烷能（CH_4E）]；

UE（MJ/kg）=滤纸和尿液的总能值－滤纸的能值；

CH_4E（kJ）=甲烷产量（L）×39.54 kJ/L[19]。

1.7 数据处理

试验数据采用 Excel 2013 进行初步处理后，采用 SAS 9.2 统计软件中的 Correlate 过程对饲料原料中的营养成分、可消化营养成分、能值等进行相关分析，用 Regression 过程进行回归分析，建立 ME 的预测方程。

2 结果与分析

2.1 5 种蛋白质饲料原料中的营养成分含量

5 种蛋白质饲料原料中的营养成分含量见表 2。

表 2　5 种蛋白质饲料原料中的营养成分含量（干物质基础）

Table 2　Nutrient contents of five protein feedstuffs (DM basis)

项目 Items	豆粕 Soybean meal	菜籽粕 Rapeseed meal	棉籽粕 Cottonseed meal	花生粕 Peanut meal	玉米干全酒糟及其可溶物 Corn DDGS
项目 Items					
干物质 DM/%	88.7	90.78	90.69	93.02	87.89
有机物 OM/%	82.83	83.33	84.77	85.54	83.67
总能 GE/(MJ/kg)	16.93	17.56	16.70	17.54	18.59
粗蛋白质 CP/%	43.85	38.94	44.24	48.54	28.23
中性洗涤纤维 NDF/%	11.71	22.87	24.93	14.71	28.53
酸性洗涤纤维 ADF/%	8.77	18.48	17.39	11.73	11.62
粗脂肪 EE/%	1.08	2.42	0.40	1.96	8.11

2.2 5 种蛋白质饲料原料中各营养成分的表观消化率及有效能值

通过消化代谢试验、呼吸代谢试验实测饲粮各营养成分的表观消化率以及 FE、UE、CH_4-E、DE、ME，结合经典套算法公式得到 5 种蛋白质饲料原料中各营养成分的表观消化率以及 DE、ME（表 3）。5 种蛋白质饲料原料中各营养成分的表观消化率、DE 和 ME 存在显著差异（P<0.05）。

表 3　5 种蛋白质饲料原料中各营养成分的表观消化率及有效能值（干物质基础）

Table 3　Apparent digestibility of nutrients and effective energy values of 5 protein feedstuffs (DM basis)

项目 Items	豆粕 Soybean meal	菜籽粕 Rapeseed meal	棉籽粕 Cottonseed meal	花生粕 Peanut meal	玉米干全酒糟及其可溶物 Corn DDGS	SEM	*P* 值 *P*-value
干物质表观消化率 DM apparent digestibility/%	70.31[b]	56.28[c]	81.05[a]	76.32[a]	65.01[b]	1.897	<0.001
有机物表观消化率 OM apparent digestibility/%	74.11[b]	60.94[d]	84.43[a]	81.27[a]	68.71[c]	1.827	<0.001
粗蛋白质表观消化率 CP apparent	96.73[a]	49.86[d]	89.57[b]	94.24[ab]	81.84[c]	3.445	<0.001

digestibility/%							
总能表观消化率 GE digestibility/%	76.79^{b}	61.50^{c}	83.85^{a}	84.07^{a}	75.21^{b}	1.737	<0.001
中性洗涤纤维表观消化率 NDF apparent digestibility/%	34.93^{d}	59.59^{a}	54.79^{ab}	44.75^{c}	47.59^{bc}	2.040	<0.001
酸性洗涤纤维表观消化率 ADF apparent digestibility/%	16.04^{c}	48.84^{a}	33.52^{b}	20.74^{c}	19.38^{c}	2.975	<0.001
消化能 DE/(MJ/kg)	15.90^{c}	12.83^{d}	16.89^{b}	17.40^{ab}	17.94^{a}	0.485	<0.001
代谢能 ME/(MJ/kg)	10.98^{b}	9.50^{c}	14.78^{a}	14.89^{a}	15.00^{a}	0.379	<0.001

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著（P>0.05），不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference（P>0.05）, while with different small letter superscripts mean significant difference （P<0.05）.

2.3 饲料原料中的营养成分含量与 DE 和 ME 的相关关系

将蛋白质饲料原料中的营养成分含量与通过套算法得出的 DE 和 ME 进行相关性分析（表 4），得出饲料原料中的 OM 含量与 ME 存在极显著正相关（P＜0.01）。

表 4 饲料原料中的营养成分含量与消化能和代谢能的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between DE or ME and nutrient contents of feedstuffs

项目 Items	干物质 DM	有机物 OM	总能 GE	粗蛋白质 CP	粗脂肪 EE	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF
消化能 DE	NS	0.575^{**}	NS	NS	NS	NS	NS
代谢能 ME	NS	0.669^{**}	NS	NS	NS	NS	NS

**表示极显著相关（P＜0.01），*表示显著相关（P＜0.05），NS 表示相关性不显著（P>0.05）。表 7 同。

** means extremely significant correlation (P＜0.01), and * means significant correlation (P＜0.05), while NS mean no significant correlation (P>0.05). The same as Table 7.

将饲料原料中的营养成分含量与 DE 和 ME 的相关性分析结果（表 4）引入线性回归分析，建立饲料原料中的营养成分含量与 DE 和 ME 之间的预测方程（表 5），结果表明，DE 和 ME 可以用蛋白质饲料原料中的营养成分含量进行预测。试验结果还发现，不同来源的蛋

白质饲料组成的预测模型中 DE 和 ME 的最佳预测因子均为 OM，通过 OM 与其他饲料原料中的营养成分进行搭配，预测模型的相关系数（R^2）均有不同程度的提高。

表 5　利用饲料原料中的营养成分含量预测消化能和代谢能的方程

Table 5　Equations of DE and ME predicted by nutrient contents of feedstuffs

项目 Items	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	*P* 值 *P*-value
消化能 DE	DE=-78153+1.123OM	0.331	＜0.01
	DE=-87.891+1.277OM-0.235ADF	0.531	＜0.01
	DE=-94.358+1.343OM-0.336ADF+0.109NDF	0.628	＜0.01
代谢能 ME	ME=-127.158+1.67OM	0.448	＜0.01
	ME=-148.883+1.914OM+0.401EE	0.665	＜0.01
	ME=-77.310+2.347OM+1.886EE-6.424GE	0.880	＜0.01
	ME=-82.855+2.391OM+1.802EE-6.21GE-0.121ADF	0.910	＜0.01

预测方程是基于 30 个样品的 DE 和 ME 的实测值。表 8 同。

Prediction equations are based on the measured values from DE and ME of 30 samples. The same as Table 8.

利用本试验得到的 ME 与饲料原料中的营养成分含量相关关系的三元方程 ME=-77.310+2.347OM+1.886EE-6.424GE 和四元方程 ME=-82.855+2.391OM+1.802EE-6.21GE-0.121ADF 对 ME 进行预测，将预测值与本试验条件下依托套算法所得的 ME 的套算值进行比较，结果见表 6。可以看出，由三元方程得出的豆粕、菜籽粕、棉籽粕、花生粕以及玉米干酒糟及其可溶物的 ME 的预测值与套算法所得套算值之间的偏差分别为-2.85%、2.68%、1.13%、-1.42%和-0.21%，而采用四元方程得到的 ME 的预测值与套算法所得套算值之间的偏差分别为-0.18%、-0.19%、-0.14%、-0.10%和-0.12%。与实测的套算值相比，四元方程较三元方程的整体偏差较低，预测值更接近于实测的套算值。

表 6　蛋白质饲料原料代谢能预测值与套算值的比较

Table 6　Comparison between predicted value and substitution value of ME for protein feedstuffs

项目 Items	套算值 Substitution value/(MJ/kg)	三元方程 Three elements equation		四元方程 Four elements equation	
		预测值 Predicted value/(MJ/kg)	与套算值偏差 Deviation with substitution	预测值 Predicted value/(MJ/kg)	与套算值偏差 Deviation with substitution

			value/%		value/%
豆粕 Soybean meal	10.98	10.37	-2.85	10.94	-0.18
菜籽粕 Rapeseed	9.50	10.02	2.68	9.46	-0.19
棉籽粕 Cottonseed	14.78	15.12	1.13	14.74	-0.14
花生粕 Peanut	14.89	14.47	-1.42	14.86	-0.10
玉米干全酒糟及其 Corn DDGS	15.00	14.94	-0.21	14.96	-0.12

2.4 饲料原料中的可消化养分与 DE 和 ME 的相关关系

利用饲料原料中各营养成分的含量及其对应的表观消化率，计算出饲料原料中的可消化干物质（DDM）、可消化粗蛋白质（DCP）、可消化有机物（DOM）、可消化粗脂肪（DEE）、可消化酸性洗涤纤维（DADF）、可消化中性洗涤纤维（DNDF），并将其与通过套算法得出的 DE 和 ME 进行相关性分析。由表 7 可知，饲料原料中的 DDM、DOM 和 DCP 与 DE 和 ME 均存在极显著正相关（P＜0.01）；另外，DADF 与 DE 存在极显著负相关（P＜0.01），与 ME 存在显著负相关（P＜0.05）。

表 7 饲料原料中的可消化营养成分与消化能和代谢能的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between DE or ME and digestible nutrients of feedstuffs

项目 Items	可消化干物质 DDM	可消化有机物 DOM	可消化粗蛋白质 DCP	可消化粗脂肪 DEE	可消化中性洗涤纤维 DNDF	可消化酸性洗涤纤维 DADF
消化能 DE	0.808**	0.828**	0.538**	NS	NS	-0.500**
代谢能 ME	0.608**	0.617**	0.255**	NS	NS	-0.401*

将饲料原料中的可消化营养物质与 DE 和 ME 的分析结果（表 7）引入线性回归分析，建立饲料原料中可消化营养物质与 DE 和 ME 之间的预测方程(表 8)，结果表明，通过 DOM、DEE、DCP 以及 DADF 搭配可准确地预测 DE，R^2 达到 0.934；通过 DOM 和 DEE 搭配可准确的预测 ME，R^2 达到 0.841。另外，ME 也可以通过 DE 和 DEE 进行准确地预测，R^2 达到 0.879（表 9），说明采用多种可消化营养物质结合 DE 共同预测 ME 效果最好，拟合方程具有良好的参考价值。

表 8 利用饲料原料中的可消化营养成分预测消化能和代谢能的方程

Table 8 Equations of DE and ME predicted by digestible contents of feedstuffs

项目 Items	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	P 值 P-value
消化能 DE	DE=5.083+20.015DOM	0.686	＜0.01
	DE=0.939+25.853DOM+29.447DEE	0.865	＜0.01
	DE=2.902+23.799DOM+24.199DEE-17.765DADF	0.923	＜0.01
	DE=4.532+30.326DOM-42.7DADF-11.366DCP	0.934	＜0.01
	DE=3.649+28.52DOM+10.259DEE-33.466DADF-7.472DCP	0.941	＜0.01
代谢能 ME	ME=2.232+19.542DOM	0.380	＜0.01
	ME=-5.564+30.526DOM+55.402DEE	0.841	＜0.01

表 9　利用饲料原料中的可消化营养成分和消化能预测代谢能的方程

Table 9　Equations of ME predicted by digestible contents and DE of feedstuffs

项目 Item	预测方程 Prediction equation	相关系数 R^2	P 值 P-value
代谢能 ME	ME=-5.412+1.142DE	0.797	＜0.01
	ME=-5.787+1.126DE+20.769DEE	0.879	＜0.01

3　讨　论

3.1　饲料原料中的营养成分含量对其表观消化率的影响

饲料中各营养成分的消化率可作为评定其营养价值的重要参数，而不同饲料原料之间的营养成分含量和饲料自身的差异也直接影响其在动物体内的消化利用情况。另外，饲料中各营养成分的消化率还受动物种类、饲料组成、饲料的加工制作方法、饲养水平等的影响。本试验条件下，除了基础饲粮中替代的部分，各饲粮中其他部分均可视为一致，通过套算法计算各个饲料原料的营养成分表观消化率，发现不同饲料原料之间存在显著差异。主要表现为：第一，豆粕作为反刍动物饲粮蛋白质的主要来源，其 CP 的表观消化率高于其他几种原料，说明豆粕源的蛋白质更容易被动物机体吸收，而棉籽粕和花生粕的 CP 含量虽高于豆粕，但其表观消化率不及豆粕，可能原因在于豆粕中易被降解的小分子蛋白质和多肽类物质高于棉籽粕和花生粕，因此其 CP 表观消化率高于后两者；第二，菜籽粕 NDF 和 ADF 的表观消化率均高于其他几种原料，可能是由于菜籽粕饲粮的适口性较差，试验羊每天均为多次采食才完成所有饲粮的采食，而粗纤维的降解主要依靠动物瘤胃内纤维分解菌完成，进而导致瘤胃降解菌对其消化较完全，因此其 NDF 和 ADF 的表观消化率高于其他几种原料。Tafaj 等[20]研究也表明，营养成分的消化率和采食量存在密切关系，采食量降低，营养成分的消化率提高，且每日多次采食比单次采食可提高动物对营养成分的消化率。

3.2　利用饲料原料中的营养成分含量建立蛋白质饲料原料 DE 的预测模型

蛋白质饲料（CP 含量>20%）作为动物营养需要首要必须满足的要素之一，一直被作为热门研究对象，不少学者均试图通过研究动物对蛋白质的最适需要量去探究蛋白质饲料在动物瘤胃和小肠内的消化代谢规律，并发现单纯的饲粮营养水平与动物的真实营养需要量存在差异[21]，而目前国际普遍应用 ME 作为评价饲粮在肉羊体内的代谢利用情况[6]。对于反刍动物而言，目前大多采用饲料原料中的营养成分含量或可消化营养成分预测有效能值这一研究方法[22-23]，由于预测因子可通过实验室常规分析后获得，再通过计算公式得到有效能的估测值，可以保证预测模型的客观性和合理性。这无论是对生产中饲粮配方的制订还是对肉羊营养需要的研究，都具有重要意义。我国可作为反刍动物采食的蛋白质源饲料种类较多，无法将每一种蛋白质饲料原料饲喂肉羊，通过消化代谢试验和呼吸代谢试验去评价饲料在动物体内的真实利用情况，并计算 ME，因此需要研究蛋白质饲料原料中的营养成分含量与 ME 的相关关系，通过建立预测模型对蛋白质饲料原料的在肉羊体内的消化情况进行估测。在本试验条件下，发现 DE 和 ME 均和饲料原料中的 OM 含量存在极显著正相关，这和前人研究饲粮有效能值和饲粮营养成分含量的相关关系[10]以及粗饲料有效能植和饲料原料中的营养成分含量的相关性[24]时所得结果一致，说明饲料原料中的 OM 含量均可作为饲粮、粗饲料以及蛋白质饲料原料有效能值预测模型的预测因子。目前关于预测模型建立的报道多见于单胃动物[25-26]及奶牛[23]，而对肉羊 ME 预测模型的研究不多，且研究报道不一。赵明明等[24]采用套算法估测肉羊粗饲料的 ME，发现粗饲料原料中的营养成分含量和 ME 之间存在显著相关性，故可用饲料原料中的营养成分含量建立粗饲料 ME 的预测模型，并分别以三元方程和五元方程列出 ME 的预测模型：ME=-31.002-0.097NDF+0.474OM+0.154CP（R^2=0.953），ME=6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP（R^2=0.994）。从最佳预测因子和组合因子比较，利用粗饲料原料中的营养成分含量和利用蛋白质饲料原料中的营养成分含量预测 ME 的最佳预测因子不同，但预测方程中 R^2 均高于混合饲粮 ME 预测模型的 R^2[10]，并且均发现随着预测因子的增多，预测值更接近于套算法测定值。另外，赵江波等[27]采用采用同样方法估测肉羊精饲料的 ME，结果发现，精饲料原料中的营养成分含量和 ME 之间无显著相关性，故无法用饲料原料中的营养成分含量建立精饲料 ME 的预测模型，结合本试验结果，分析其原因主要是由于精饲料范围较大，能量饲料和蛋白质饲料存在着差异，将二者放在一起预测 ME，可能会出现预测模型 R^2 偏小或无法建立预测模型。而潘晓花等[13]将

NRC（2012）推荐猪的 ME 需要量和饲料原料中的营养成分含量进行预测模型的建立，结果发现以饲料原料的常规营养成分含量为自变量时，难以建立适用于所有类型饲料原料的 ME 预测模型，而通过将饲料原料分类后可构建 ME 预测模型。本试验中利用饲料原料中的营养成分含量成功构建 ME 预测模型也在一定程度上说明分类构建的可行性。

从本试验所得的利用饲料原料中的营养成分含量预测有效能值的模型中发现，最佳预测因子均为 OM，与先前试验采用能量饲料预测 ME 最佳预测因子不同，能量饲料有效能值的最佳预测因子是 CP[28]，故推测不同饲料类型所得的预测模型中最佳预测因子不同。这也间接验证了潘晓花等[13]提出的将饲料分类后可预测 ME 的可行性。另外，研究发现，利用 OM 结合其他营养成分指标预测 ME，随着预测因子的增多，预测模型中 R^2 均有不同程度的提高，最高达到 0.910。比较其他国家饲养标准建立的预测模型，我们发现，NRC（2001）[29]提出脂肪 DE 转化为 ME 的效率接近 100%，可建立以 EE 和 DE 为预测因子的 ME 预测模型，推荐的饲粮 ME 预测模型为 ME=（1.01DE-0.45）+0.046×（EE-3），其中 EE 指的是饲粮总的 EE 含量（高于 3%）。其推荐的 ME 预测模型针对的是整个饲粮，本试验研究得出，蛋白质饲料原料的 EE 仍可作为 ME 的预测因子之一，另外，本试验更深层次的意义是以饲料原料为研究手段，以建立饲料原料 ME 的预测模型为研究目标，使建立的模型更符合生产实际需求。

3.3　利用饲料原料中的可消化养分建立蛋白质饲料原料 ME 的预测模型

研究表明，饲粮可消化养分可用于反刍动物 ME 的预测[24]。本试验采用套算法结合体内法解释各个蛋白质饲料原料在肉羊体内的真实代谢规律，并得出蛋白质饲料原料的 DE、ME 及可消化营养成分，通过相关性分析建立有效能值的预测模型。结果发现，与饲料原料中的营养成分含量预测 ME 比较，可消化养分建立的 ME 预测模型 R^2 更高，说明可消化养分不仅可预测 ME，而且方法准确性更高。其主要可能有以下几个原因：第一，可消化营养成分是通过套算法得到的，是动物对饲料原料的真实消化利用情况，而饲料原料中的营养成分含量是经过实验室分析得到的实测值，二者有一定区别；第二，一些蛋白质饲料原料自身存在抗营养因子，单纯的以饲料原料中的营养成分含量预测 ME 可能会导致预测结果跟动物实际 ME 有偏差，造成营养素的浪费或由于营养摄入量不足抑制动物生长性能的完全发挥。本试验发现，ME 的最佳预测因子是 DOM，Alderman[30]同样推荐以 DOM 为预测因子建立

ME 的预测模型，这和本试验研究结果一致。本试验还发现 DOM 与其他因子结合后预测 ME，R^2 值更高，最高达到 0.841，说明利用可消化营养成分建立的 ME 预测模型的可行性强、准确性较高。另外，DE 可通过消化代谢试验进行准确测定，而 ME 还须考虑气体装置的使用，并非所有试验点都具备此条件，因此利用 DE 建立 ME 的预测模型可广泛的被应用。本试验研究表明，用 DE 与可消化营养成分共同预测 ME，预测方程的 R^2 最高，可达 0.879，说明预测模型的准确性更高。另外，本试验实测的有效能值中 ME/DE 的平均值为 0.81，与 NRC（2007）[31]推荐的 ME=0.82DE 比较，略低于推荐值，究其原因在于 NRC（2007）[31]给出的只是推荐值，与实际情况可能存在一定差异，而本试验所得数据均为实测值。另外，不同蛋白质饲料原料的抗营养因子不同，因而其在动物体内的消化代谢率也存在一定差异，最终造成和推荐值有所差异。

4 结 论

① 利用饲料原料中的营养成分含量可预测蛋白质饲料原料的 ME，且随着预测因子的增加，预测方程的准确性有所提高，ME 的预测方程为：ME（MJ/kg）=-82.855+2.391OM+1.802EE-6.21GE-0.121ADF（R^2=0.910，n=30，P<0.01）。

② 利用饲料原料中的可消化营养成分可预测蛋白质饲料原料的 ME，ME 的预测方程为：ME=-5.564+30.526DOM+55.402DEE（R^2=0.841，n=30，P<0.01）；此外，还可利用饲料原料中的可消化营养成分和 DE 共同建立 ME 的预测方程，ME 的预测方程为：ME（MJ/kg）=-5.787+1.126DE+20.769DEE（R^2=0.879，n=30，P<0.01）。

参考文献：

[1] 许贵善.20–35kg 杜寒杂交羔羊能量与蛋白质需要量参数的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2013.

[2] DENG K D,JIANG C G,TU Y,et al.Energy requirements of Dorper crossbred ewe lambs[J].Journal of Animal Science,2014,92(5):2161–2169.

[3] MA T,DENG K D,TU Y,et al.Effect of feed intake on metabolizable protein supply in Dorper×thin-tailed *Han* crossbred lambs[J].Small Ruminant Research,2015,132:133–136.

[4] 潘晓花,杨亮,薛夫光,等.硫胺素在瘤胃内的合成及其在预防亚急性瘤胃酸中毒中的应用[J].动物营养学报,2016,28(5):1294–1301.

[5] 闫益波,张玉换.肉羊全混合日粮技术应用研究进展[J].中国饲料,2016(2):19–24.
[6] 冯仰廉,陆治年.奶牛营养需要和饲料成分[J].3版.北京:中国农业出版社,2007.
[7] 石天虹,张桂芝,刘雪兰,等.肉仔鸡生长性能与饲粮营养水平关系模型的建立及应用[J].动物营养学报,2012,24(7):1283–1292.
[8] LE G G,NOBLET J.Comparative total tract digestibility of dietary energy and nutrients in growing pigs and adult sows[J].Journal of Animal Science,2001,79(9):2418–2427.
[9] ANDERSON P V,KERR B J,WEBER T E,et al.Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs[J].Journal of Animal Science,2012,90(4):1242–1254.
[10] 刘洁,刁其玉,赵一广,等.肉用绵羊饲料养分消化率和有效能预测模型的研究[J].畜牧兽医学报.2012,43(8):1230–1238.
[11] 赵明明,杨开伦,邓凯东,等.直接法与替代法测定羊草对肉用绵羊代谢能值的比较研究[J].动物营养学报,2016,28(2):436–443.
[12] 赵江波,魏时来,马涛,等.套算法用于估测肉用羊单一谷物饲料代谢能值及养分消化率的探索[J].畜牧兽医学报,2016,47(7):1405–1413.
[13] 潘晓花,杨亮,庞之洪,等.猪饲料有效能值预测模型的构建[J].动物营养学报,2015,27(5):1450–1460.
[14] DENG K D,DIAO Q Y,JIANG C G,et al.Energy requirements for maintenance and growth of Dorper crossbred ram lambs[J].Livestock Science,2012,150(1/2/3):102–110.
[15] GALVANI D B,PIRES C C,KOZLOSKI G V,et al.Energy requirements of Texel crossbred lambs[J].Journal of Animal Science,2008,86(12):3480–3490.
[16] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:中国农业大学出版社,2007.
[17] ADEOLA O.Digestion and balance techniques in pigs[M]//LEWIS A J,SOUTHERN L L.Swine Nutrition.2nd ed.Washington,DC:CRC Press,2001:906.
[18] 刘德稳.生长猪常用七种饲料原料净能预测方程[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.
[19] 杨嘉实,冯仰廉.畜禽能量代谢[M].北京:中国农业出版社,2004.

[20] TAFAJ M,STEINGASS H,DROCHNER W.Influence of hay particle size at different concentrate and feeding levels on digestive processes and feed intake in ruminants.2.passage,digestibility and feed intake[J].Archives of Animal Nutrition,2001,54(3):243–259.

[21] MA T,DENG K D,TU Y,et al.Effect of feed intake on metabolizable protein supply in Dorper×thin-tailed Han crossbred lambs[J].Small Ruminant Research,2015,132:133–136.

[22] STERGIADIS S,ALLEN M,CHEN X J,et al.Prediction of nutrient digestibility and energy concentrations in fresh grass using nutrient composition[J].Journal of Dairy Science,2015,98(5):3257–3273.

[23] STERGIADIS S,ALLEN M,CHEN X J,et al.Prediction of metabolisable energy concentrations of fresh-cut grass using digestibility data measured with non-pregnant non-lactating cows[J].British Journal of Nutrition,2015,113(10):1571–1584.

[24] 赵明明,马涛,马俊南,等.肉用绵羊常用粗饲料有效能值的预测与方程的建立[J].动物营养学报,2016,28(8):2385–2395.

[25] 李杰,贾刚,赵华,等.应用化学成分建立天府肉鸭豆粕净能预测模型的研究[J].动物营养学报,2015,27(10):3110–3117.

[26] WU F,JOHNSTON L J,URRIOLA P E,et al.Evaluation of NE predictions and the impact of feeding maize distillers dried grains with solubles (DDGS) with variable NE content on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2016,215:105–116.

[27] 赵江波,魏时来,马涛,等.应用套算法估测肉羊精饲料代谢能[J].动物营养学报,2016,28(4):1217–1224.

[28] 万凡,赵江波,马涛,等.基于杜泊×小尾寒羊杂交肉羊能量代谢试验与套算法评定燕麦、大麦、小麦、高粱、玉米的代谢能[J].中国畜牧杂志,2017(4):页码待补充

[29] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[30] ALDERMAN G.Energy and protein requirements of ruminants[M]. Wallingford:CAB

International,1993.

[31] NRC.Nutrient requirements of small ruminants:sheep,goats,cervids,and new world camelids[S].Washington,D.C.:National Academy Press,2007.

Establishment of Prediction Model of Metabolizable Energy of Protein Feedstuffs for Mutton Sheep Using Nutrient Contents and Digestible Nutrients of Feedstuffs[1]

WAN Fan[1,2] ZHAO Jiangbo[1] MA Tao[1] ZANG Changjiang[2] MA Chen[2] YANG Kailun[2] DIAO Qiyu[1]

(1. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture*, *Feed Research Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 2 *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: This experiment aimed to investigate the effects of nutrient contents and digestible nutrients of common protein feedstuffs for mutton sheep on effective energy values using substitution method, and to establish the prediction equations for metabolizable energy (ME) of protein feedstuffs based on nutrient contents and digestible nutrients of feedstuffs. Thirty-six castrated Dorper×thin-tailed *H*an F_1 crossbred rams with the body weight of (52.6±1.4) kg and the age of 22 months were randomly assigned to 6 groups with one group fed basal diet and the other 5 groups fed experimental diets. Digestion and metabolism experiment and respiration and metabolism experiment were conducted combined with substitution method to measure and calculate the digestible energy (DE) and ME of individual protein feedstuffs. Correlation analysis was conducted between nutrient contents including dry matter (DM), organic matter (OM), gross energy (GE), crude protein (CP), ether extract (EE), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and digestible nutrients including digestible dry matter (DDM), digestible organ matter (DOM), digestible crude protein (DCP), digestible ether extract (DEE), digestible neutral detergent fiber (DNDF), digestible acid detergent fiber (DADF) and DE or ME of protein feedstuffs. The results showed as follows: the OM content, DDM, DOM and DCP of feedstuffs had extremely significant positive correlations with DE or ME (P<0.01); moreover, the DADF had

*Corresponding author, professor, E-mail: diaoqiyu@caas.cn (责任编辑 菅景颖)

an extremely significant negative correlation with DE (P<0.01), and had a significant negative correlation with ME (P<0.05). The prediction equation of ME using nutrient contents of feedstuffs was: ME (MJ/kg)=-82.855+2.391OM (%)+1.802EE(%)-6.21GE (MJ/kg)-0.121ADF (%) (R^2=0.910, n=30, P<0.01). The prediction equation of ME using digestible nutrients of feedstuffs was: ME (MJ/kg)=-5.564+30.526DOM (%)+55.402DEE (%) (R^2=0.841, n=30, P<0.01). The prediction equation of ME using digestible nutrients and DE of feedstuffs was: ME (MJ/kg)=-5.787+1.126DE (MJ/kg)+20.769DEE (%) (R^2=0.879, n=30, P＜0.01). In conclusion, in this experiment, the some nutrient contents and digestible nutrients of protein feedstuffs significantly correlated with ME, and they can be effectively used to predict the ME of protein feedstuffs for mutton sheep.

Key words: mutton sheep; metabolizable energy; digestibility energy; protein feedstuffs; digestible nutrients; prediction model